

Сверхпроводящие корректирующие магниты УНК

Л.М. Васильев, С.С. Козуб, К.П. Мызников, В.В. Сытник,
 Е.В. Ткаченко, Л.М. Ткаченко, П.Н. Чирков
 ГИЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

Коррекция магнитного поля в сверхпроводящей (СП) ступени УНК [1] будет осуществляться с помощью следующих основных систем:

- системы коррекции замкнутой орбиты по горизонтали и по вертикали, состоящие из дипольных корректоров с горизонтальным и вертикальным полем соответственно и обеспечивающие подавление случайных искажений замкнутой орбиты, не превышающих ± 30 мм при максимальной энергии пучка (3000 ГэВ);
- системы коррекции бетатронных частот, состоящие из квадрупольных корректоров и регулирующие частоты в диапазоне $\pm 0,7$ при максимальной энергии пучка;
- системы коррекции хроматичности и возбуждения резонансной гармоники для медленного вывода пучка из ускорителя.

Силы корректоров определяются следующими интегральными величинами: $F^{(m)} = \int d^m B / dx^m ds$, где производная индукции поля вычисляется на оси корректора, а степень рабочего мультиполя $m = 0; 1; 2$ — для дипольного, квадрупольного и секступольного корректоров соответственно. “Неидеальность” магнитного поля в корректоре m -типа характеризуется относительными величинами интегральных нелинейностей:

$$C_{n+1} = \frac{r_0^n}{n!} \int \frac{d^n B}{dx^n} ds / \frac{r_0^m}{m!} F^{(m)},$$

где $r_0 = 35$ мм — радиус нормализации, соответствующий полуширине вакуумной камеры II ступени УНК.

Предельные силы корректоров, их количество и допустимая неидеальность магнитного поля в них в диапазоне тока питания $(0, 1 \div 1, 0) I_{max}$ приведены в табл.1.

Таблица 1: Основные требования к корректирующим магнитам.

Система коррекции	Тип корректора	Сила, Э-м/ см ^m	Число	Допуски, %
Орбиты по горизонтали	Диполь (m=0)	6800	208	$C_2 < 1, C_4 < 3,$
Орбиты по вертикали			215	$C_7 < 1, C_{n+1} < 10$
Бетатронных частот	Квадруполь (m=1)	550	320	$C_{3,4} < 1, C_5 < 4,$ $C_{n+1} < 10$
Хроматичности и медленного вывода	Секступоль (m=2)	600	320	$C_4 < 1, C_5 < 2,$ $C_6 < 6, C_{n+1} < 10$

1. Требования к конструкции

Конструкция корректирующих элементов определяется требованиями системы коррекции и пространством, отведенным для его размещения. Во II ступени УНК квадрупольные и секступольные корректоры, а также основная масса дипольных корректоров размещаются в 320 участках длиной около 4 м, расположенных в регулярной части магнитной

структуры около основных квадрупольных линз. Помимо корректоров, во всех этих участках находится пикап-электрод, жестко соединенный с квадрупольной линзой. Кроме этого, в определенных участках расположены ограничители нормальной фазы, трубы для аварийного сброса гелия и отогрева СП-магнитов и вакуумный пост откачки криостатов.

С учетом ограниченности пространства для размещения корректоров был разработан и исследован СП-корректирующий магнит, в котором дипольная, квадрупольная и секступольная обмотки, каждая длиной $\sim 1,5$ м, объединены в единый блок [2]. Анализ характеристик такого мультипольного корректора выявил ряд недостатков в его конструкции, основные из них:

- наличие значительного гистерезиса зависимости основной компоненты магнитного поля от тока и взаимовлияние обмоток из-за намагниченности СП-провода, вызывающие большие затруднения при управлении системой коррекции;

- необходимость введения внутренней опорной трубы, так как при совместной запитке СП-обмоток возникают пондеромоторные силы, направленные к оси магнита.

Последовательное расположение обмоточных блоков корректирующих магнитов исключает их взаимное влияние и снижает расход сверхпроводника при изготовлении корректоров. Вышеуказанные недостатки отсутствуют в корректоре, изготовленном по типу “суперферрик”, магнитное поле которого формируется железным экраном. В таких магнитах вклад от намагниченности сверхпроводника практически исчезает, за счет чего гистерезис основной компоненты поля существенно уменьшается и определяется свойствами магнитопровода.

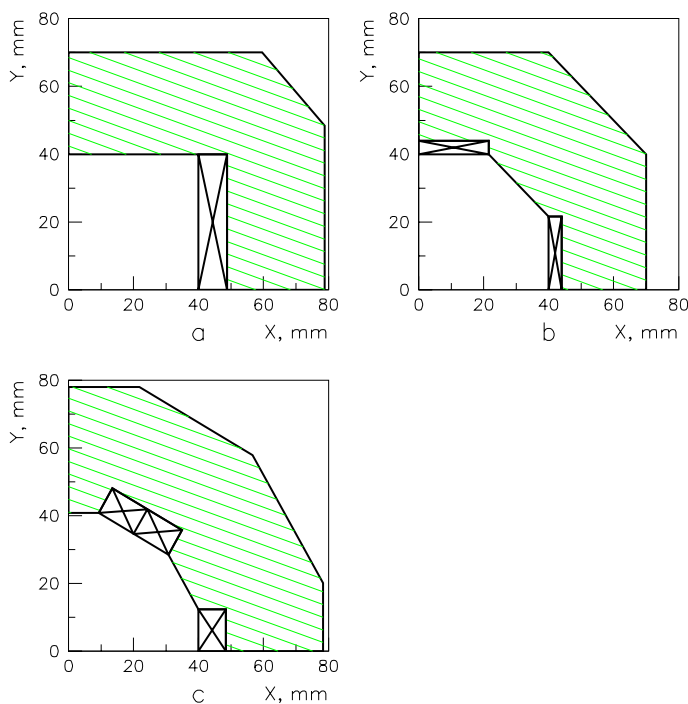


Рис. 1: Поперечные сечения дипольного (а), квадрупольного (b) и секступольного (с) корректоров.

есть внутренний диаметр 186 мм и продольную длину 2,1 м. Расстояние от центра магнита до обмотки определяется поперечными размерами криостата и равно $r = 40$ мм. СП-обмотка сжата железным ярмом, которое выполняет роль бандажа и магнитопровода.

Расчеты магнитных характеристик и оптимизация геометрии корректирующих магнитов проводились с помощью программы MULTIC [3].

На рис.1 схематически показаны поперечные сечения дипольного, квадрупольного и секступольного корректоров. В процессе моделирования корректирующих магнитов II ступени УНК в качестве токонесущего элемента использован СП-провод из сверхпроводящего сплава Nb+50%Ti(НТ-50), число волокон 150, средний диаметр волокна 15 мкм, шаг твистирования 25 мм, диаметр по изоляции 0,4 мм, без изоляции — 0,3 мм. Проведено измерение характеристик такого СП-провода в магнитном поле 5 Тл при температуре 4,2 К. Критический ток СП-проводов превышает величину 50 А, соответствующую критической плотности тока $1,8 \times 10^5$ А/см². Расчетный номинальный ток I_{max} выбран равным 20 А.

Криостат, в котором устанавливаются корректирующие магниты, имеет

2. Дипольный корректор

Поперечные размеры обмоточного блока дипольного корректора определяются заданными выше параметрами (табл.1) и размерами криостата. Высота обмотки b равна r , а ее толщина a вычисляется по формуле (в системе Гаусса) $a = (10d^2 F^{(0)}) / (4\pi L_{ef} I_0)$, где L_{ef} — эффективная длина диполя; $F^{(0)}$ — сила корректора.

Зависимость индукции поля в центре диполя B от толщины магнитного экрана ΔFe показана на рис.2а для разных значений L_{ef} , а на рис.2б представлены зависимости $\eta(L_{ef})$ для разных толщин ΔFe при номинальном значении тока, где $\eta = (B - B_0) / B_0$; B — центральное поле диполя с реальной зависимостью $\mu(B)$; B_0 — центральное поле диполя при бесконечно большой магнитной проницаемости железа.

На рис.3 показаны зависимости низших конструктивных нелинейностей C_3 и C_5 от толщины магнитопровода. На основании данных, представленных на рис.2 и 3, эффективная длина дипольного корректора выбрана 650 мм, а толщина магнитопровода $\Delta Fe = 30$ мм.

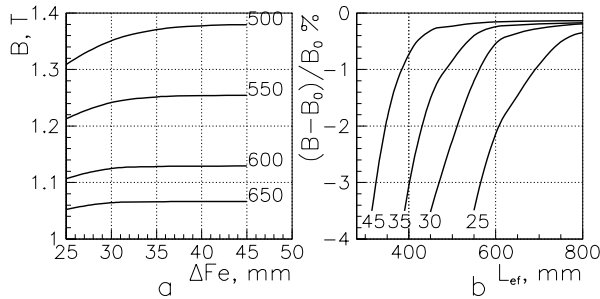


Рис. 2: Зависимости $B(\Delta Fe)$ для разных L_{ef} (а) и влияние насыщения магнитопровода на поле диполя для различных L_{ef} и ΔFe толщин магнитопровода (б).

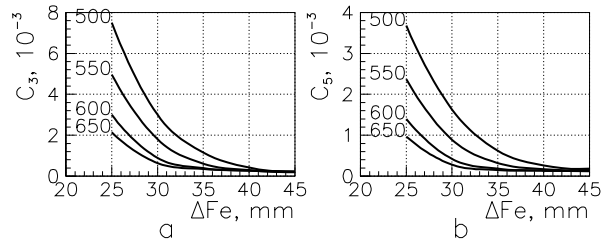


Рис. 3: Зависимости низших нелинейностей поля дипольного корректора от ΔFe при различных эффективных длинах.

3. Квадрупольный корректор

Влияние геометрических параметров на нелинейности в квадрупольных корректорах уменьшается с ростом номера нелинейности, как показано на рис. 4а, где представлены зависимости низших конструктивных нелинейностей в квадрупольном корректоре от высоты обмоточного слоя a при разных толщинах обмотки b . Сплошными линиями показаны зависимости $C_6(a, b)$, а штриховыми — $C_{10}(a, b)$. Видно, что толщина обмотки слабо влияет на величину нелинейности C_{10} , все кривые практически сливаются. Поскольку влияние нелинейностей на динамику движения пучка частиц также уменьшается с ростом номера нелинейности, то оптимальную геометрию обмотки не-

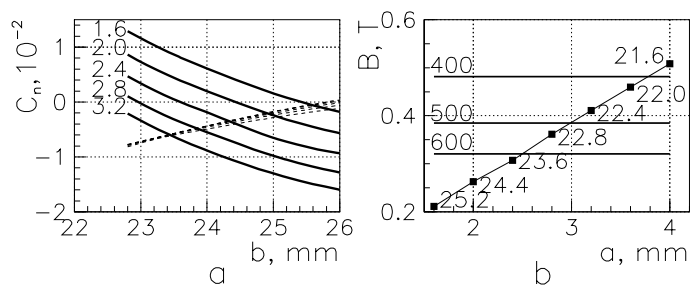


Рис. 4: Зависимость C_6 и C_{10} (а) от высоты обмотки при разных ее толщинах и зависимость индукции поля (б) от толщины обмотки при подавленной нелинейности

обходимо определять из условия $C_6 = 0$. Из рис. 4а видно, что для выбора оптимальной геометрии необходимо увеличивать высоту обмотки и уменьшать ее толщину.

На рис. 4b представлена зависимость магнитной индукции поля на радиусе 35 мм от толщины обмотки для геометрий с подавленной нелинейностью C_6 . Горизонтальными линиями показаны требуемые значения поля для разных эффективных длин квадруполья. Маркерами на графике обозначены оптимальные размеры обмотки из условия подавления C_6 . Из этих рисунков с учетом ограниченных продольных размеров криостата выбрана эффективная длина квадруполья, равная 500 мм. Оптимальное сечение обмотки для нее равно $3,2 \times 22,4 \text{ мм}^2$, а толщина магнитного экрана должна быть не менее 30 мм для уменьшения эффектов насыщения магнитопровода.

4. Секступольный корректор

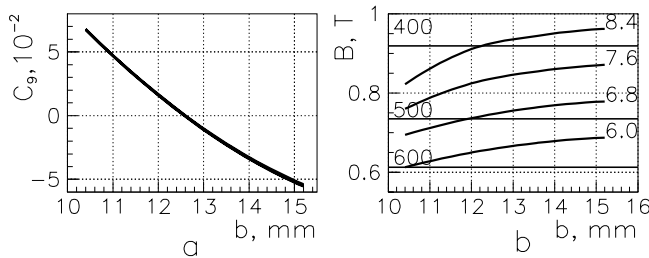


Рис. 5: Зависимость C_9 (а) и индукции поля (б) на радиусе 35 мм от толщины обмотки в секступольном корректоре.

ее толщин показана на рис. 5b. Горизонтальными линиями на этом рисунке обозначены необходимые значения магнитной индукции поля на радиусе апертуры для различных эффективных длин секступолья. Из рис. 5b следует, что для уменьшения насыщения магнитопровода при его толщине 30 мм необходимо выбирать эффективную длину секступолья, равную 600 мм.

5. Основные расчетные характеристики СП–корректоров

Суммарные результаты расчетных характеристик СП–корректоров типа “суперферрик” представлены в табл.2.

Таблица 2: Основные характеристики СП–корректоров.

Тип СП–корректора	Диполь	Квадруполь	Секступоль
Необходимая оптическая сила	0.68 Тл· м	5.5 Тл	600 Тл/м
Расчетная оптическая сила	0.692 Тл· м	5.85 Тл	600 Тл/м
Поле на радиусе апертуры, Тл	1.06	0.41	0.62
Эффективная длина, мм	650	500	600
Число катушек в обмотке	2	4	6
Сечение катушки, мм ²	6.8×40	3.2×22.4	5.6×12.4
Число витков в катушке	17×100=1700	8×56=448	14×31=434
Толщина магнитопровода, мм	30	30	30
Индуктивность, Гн	10	0.34	1.2

На рис. 6 показана зависимость критического тока от индукции магнитного поля при 4,2 К для СП-провода диаметром 0,4 мм. Здесь же представлены нагрузочные кривые дипольного, квадрупольного и секступольного корректирующих магнитов. Видно, что в более напряженных условиях работают дипольный и секступольный корректоры, однако их запас по току составляет 350%, а запас по температуре при токе 20 А — не менее 3 К.

Основной вклад в величину динамических потерь в обмотке СП-корректора дают гистерезисные потери в СП-волокнах. Расчетная величина динамических потерь в обмотке дипольного корректора в цикле УНК составила 3 Дж, в остальных корректорах она будет ниже. Следовательно, динамические потери в СП-корректоре малы и не дают заметного вклада в тепловую нагрузку на криогенную систему УНК.

Заключение

На основе проведенных расчетов разработаны отдельные корректирующие дипольные, секступольные и квадрупольные магниты типа “суперферрик” для базовой системы коррекции 2-й ступени УНК. Такая система коррекции по сравнению с аналогичной системой, основанной на мультиполюсных корректорах, имеет более простые системы управления, питания и охлаждения. Конструкция магнитов типа “суперферрик” более технологична, что удешевляет их производство, и имеет расход СП-материала в 1,6 раза меньше по сравнению с мультиполюсными корректорами.

Список литературы

- [1] Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 3000 ГэВ. (Физическое обоснование): Препринт ИФВЭ 93-27, Протвино, 1993.
- [2] Rybakov E. et al. Design and Tests of UNK Superconducting Correction Magnet Models. PAC'93, May, 1993. Washington, USA.
- [3] Ткаченко Л.М. Пакет программ MULTIC для расчета магнитных полей произвольной конфигурации: Препринт ИФВЭ 98-28, Протвино, 1998.

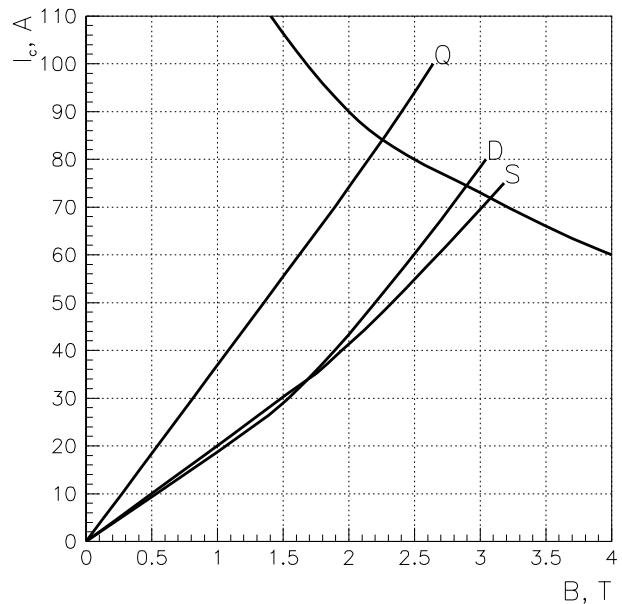


Рис. 6: Нагрузочные линии дипольного (D), квадрупольного (S) и секступольного (Q) корректоров.